

Оригинальная статья

УДК 621.791.011

DOI: 10.57070/2304-4497-2026-1(55)-94-102

ЭЛЕКТРОДУГОВАЯ НАПЛАВКА ПОРОШКОВОЙ ПРОВОЛОКОЙ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ ИЗНОСОСТОЙКИХ ПОКРЫТИЙ

© 2026 г. А. Р. Михно, Г. И. Махнева, Н. П. Ломиворотов, Е. М. Запольская, И. А. Панченко, С. В. Коновалов

Сибирский государственный индустриальный университет (Россия, 654007, Кемеровская обл. – Кузбасс, Новокузнецк, ул. Кирова, 42)

Аннотация. Представлен анализ методов создания порошковых проволок, используемых для электродуговой наплавки, с акцентом на их химический состав и микроструктуру. Для производства порошковых проволок использовали различные металлические порошки (железо, вольфрам, марганец, хром и ванадий), а также добавляли пыль газоочистки производства алюминия. Рассматривали порошковые проволоки на основе систем Fe – C – Si – Mn – Cr – W – V, Fe – C – Si – Mn – Cr – Ni – Mo, Fe – C – Si – Mn – Cr – Mo – Ni – Ti, Fe – C – Si – Mn – Cr – W – V – Ti, WC – Co, Ni/WC – Co, Fe – Cr – C и Fe – Cr – B, которые применяли для формирования защитных покрытий. Последние играют ключевую роль в промышленности, так как они увеличивают срок службы оборудования, подвергающегося значительным механическим и термическим нагрузкам. Процесс наплавки проводили с использованием сварочного трактора ASAW-1250 в пять слоев, что способствует предотвращению смешивания наплавленного металла с подложкой и повышает качество покрытия. Микроструктурные и химические характеристики были исследованы с помощью сканирующего электронного микроскопа (СЭМ), что позволило глубже понять структуру полученных материалов. В результате проведенных экспериментов выявлено, что состав порошковых проволок и режимы наплавки существенно влияют на характеристики полученного слоя. Обнаруженные глобулярные формы неметаллических включений свидетельствуют о наличии различных оксидов и силикатов, что, в свою очередь, указывает на особенности процесса формирования наплавочного слоя.

Ключевые слова: наплавочный слой, порошковая проволока, электронная микроскопия, химический состав, микроструктура, неметаллические включения

Финансирование. Исследование проводилось в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации № 075-00087-2401.

Для цитирования: Михно А.Р., Махнева Г.И., Ломиворотов Н.П., Запольская Е.М., Панченко И.А., Коновалов С.В. Электродуговая наплавка порошковой проволокой для получения износостойких покрытий. *Вестник Сибирского государственного индустриального университета*. 2026;1(55):94–102. [http://doi.org/10.57070/2304-4497-2026-1\(55\)-94-102](http://doi.org/10.57070/2304-4497-2026-1(55)-94-102)

Original article

ELECTRIC ARC SURFACING WITH POWDERED WIRE TO PRODUCE WEAR-RESISTANT COATINGS

© 2026 A. R. Mikhno, G. I. Makhneva, N. P. Lomivorotov, E. M. Zapolskaya, I. A. Panchenko, S. V. Konovalov

Siberian State Industrial University (42 Kirova Str., Novokuznetsk, Kemerovo Region – Kuzbass, 654007, Russian Federation)

Abstract. An analysis of methods for creating powder wires used for electric arc welding is presented, with an emphasis on their chemical composition and microstructure. Various metal powders (iron, tungsten, manganese, chromium and vanadium) were used for the production of powdered wires, and aluminum gas purification dust was also

added. Powder wires based on Fe – C – Si – Mn – Cr – W – V, Fe – C – Si – Mn – Cr – Ni – Mo, Fe – C – Si – Mn – Cr – Mo – Ni – Ti, Fe – C – Si – Mn – Cr – W – V – Ti, WC – Co, Ni/WC – Co, Fe – Cr – C and Fe – Cr – B, which were used to form protective coatings. The latter play a key role in industry, as they increase the service life of equipment subjected to significant mechanical and thermal stresses. The surfacing process was carried out using an ASAW-1250 welding tractor in five layers, which helps to prevent mixing of the deposited metal with the substrate and improves the coating quality. The microstructural and chemical characteristics were studied using a scanning electron microscope (SEM), which allowed for a deeper understanding of the structure of the obtained materials. As a result of the experiments, it was revealed that the composition of the powder wires and the surfacing modes significantly affect the characteristics of the resulting layer. The discovered globular forms of nonmetallic inclusions indicate the presence of various oxides and silicates, which, in turn, indicates the peculiarities of the formation of the surfacing layer.

Keywords: deposited layer, powder wire, electron microscopy, chemical composition, microstructure, non-metallic inclusions

Funding. Research was carried out within the framework of the state task of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation № 075-00087-2401.

For citation: Mikhno A.R., Makhneva G.I., Lomivorotov N.P., Zapolskaya E.M., Panchenko I.A., Kononov S.V. Electric arc surfacing with powdered wire to produce wear-resistant coatings. *Bulletin of the Siberian State Industrial University*. 2026;1(55):94–102. [http://doi.org/10.57070/2304-4497-2026-1\(55\)-94-102](http://doi.org/10.57070/2304-4497-2026-1(55)-94-102)

Введение

Прокатные валки являются важным элементом технологического процесса на металлургических предприятиях, обеспечивая формование проката путем пластического деформирования исходного материала [1; 2]. Высокая нагрузка на рабочие поверхности валков, обусловленная значительными контактными напряжениями и температурными нагрузками, вызывает быстрый износ и необходимость частых ремонтов [3; 4]. Для наплавки прокатных валков широкое распространение получили порошковые проволоки (ПП) системы Fe – C – Si – Mn – Cr – W – V [5].

Одним из наиболее распространенных методов восстановления рабочих поверхностей является электродуговая наплавка с применением ПП [6; 7]. Этот метод позволяет формировать новые слои покрытия, обладающие высокими прочностными характеристиками и износостойкостью [8 – 10]. Наплавленные покрытия представляют собой композитные материалы, состоящие из основы (матрицы), легирующих элементов и твердых частиц (например, карбидов) [11; 12].

Перспективное направление развития в области улучшения качества наплаваемых покрытий заключается в применении экономически обоснованных и рационально легированных наплавочных материалов. Экономно-легированные наплавочные сплавы обеспечивают достижение высоких механических свойств (твердости, ударной вязкости, износостойкости) при минимизации стоимости и сложности изготовления самих наплавочных составов [13; 14].

Целью настоящей работы является изучение микроструктуры образцов с минимальным содержанием неметаллических включений (силикатов,

оксидов), а также сравнительный анализ результатов исследования ПП на основе следующих систем:

1. Fe – C – Si – Mn – Cr – W – V;
2. Fe – C – Si – Mn – Cr – Ni – Mo;
3. Fe – C – Si – Mn – Cr – Mo – Ni – Ti;
4. Fe – C – Si – Mn – Cr – W – V – Ti;
5. WC – Co;
6. Ni/WC – Co;
7. Fe – Cr – C;
8. Fe – Cr – B.

Материалы и методы исследования

Для получения ПП предварительно рассчитывали состав флюса. Смешивание материалов выполняли в течение 30 мин. Изготовление ПП проводили путем волочения через фильеру, а полученную проволоку наматывали на барабан. Для наплавки электродуговых покрытий использовали сварочный трактор ASAW-1250. Наплавку выполняли на стальные пластины марки 09Г2С в пять слоев с целью предотвращения перемешивания наплаваемого металла и подложки.

Система ПП на основе Fe – C – Si – Mn – Cr – W – V была изготовлена следующим образом: наружная оболочка состояла из стальной ленты марки Ст3 толщиной 0,4 мм; внутренний порошок-наполнитель представлял собой смесь различных металлических порошков (железо ПЖВ1 (ГОСТ 9849 – 86), кремний КР-1 (ГОСТ 2169 – 69), вольфрам ПВ-1 (ГОСТ 1049 – 74), марганец МР-0 (ГОСТ 6008 – 82), хром ПХА-1М (ТУ 14-1-1474 – 75) и ванадий ВЭЛ-1 (ТУ 48-0533 – 71)) [5]. В качестве добавки на замену аморфного углерода использовали пыль газоочистки производства алюминия (ПГПА), полученную из фильтрации электро-

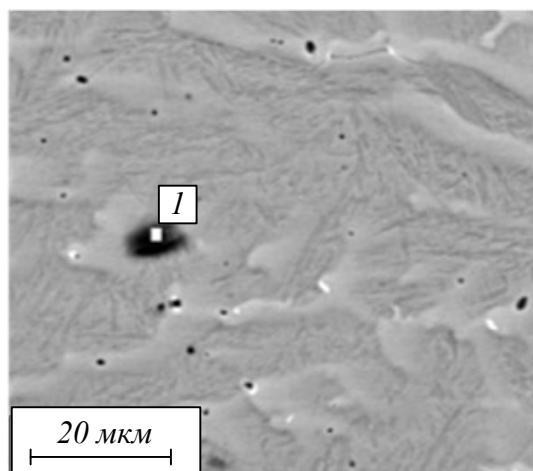


Рис. 1. Микроструктура наплавленного покрытия системы Fe – C – Si – Mn – Cr – W – V и распределение неметаллических включений
Fig. 1. Microstructure of the deposited coating of the Fe – C – Si – Mn – Cr – W – V system and distribution of non-metallic inclusions

литических печей. Общий диаметр готовой ПП составил 4,2 мм. Режим наплавки осуществляли при силе сварного тока 422 А, напряжении дуги 38,0 В, скорости подачи проволоки 18 см/мин.

Для исследования была изготовлена ПП системы Fe – C – Si – Mn – Cr – Ni – Mo диаметром 5 мм. Оболочкой проволоки служила лента из стали марки Ст3. В качестве наполнителя использовали порошки железа марки ПЖВ1 (ГОСТ 9849 – 86), ферросилиция марки ФС 75 (ГОСТ 1415 – 93), высокоуглеродистого феррохрома марки ФХ900А (ГОСТ 4757 – 91), углеродистого ферромарганца ФМн 78 (А) (ГОСТ 4755 – 91), никеля ПНК-1Л5 (ГОСТ 9722 – 97), ферромолибдена марки ФМо60 (ГОСТ 4759 – 91), кобальта ПК-1У (ГОСТ 9721 – 79) и вольфрама ПВ-1 ТУ 14-22-143 – 2000 [15]. Режим наплавки: сила сварного тока 450 А, напряжение дуги 30 В, подача проволоки 10 см/мин.

На электроэрозионном проволочно-вырезном станке струйного типа ДК7732 были получены образцы следующих размеров 20 × 55 × 14 и 20 × 20 × 20 мм. Следующим этапом была проведена пробоподготовка образцов, которая включала в себя шлифование, полирование и травление поверхности азотной кислотой (HNO₃) с целью выявления структуры. Изучение структуры и химического состава наплавленного слоя проводили в лаборатории электронной микроскопии и обработки изображений Сибирского государственного индустриального университета с использованием сканирующего электронного микроскопа (СЭМ) KYKY-EM6900.

Результаты и их обсуждение

При исследовании сплава Fe – C – Si – Mn – Cr – W – V выявлена микроструктура наплавленного слоя «волоконистого» строения, с четко выраженными линиями по границе зерен, что может указывать на процесс кристаллизации во время наплавления (рис. 1). Было установлено, что в рассматриваемой области присутствуют следующие элементы: 2,22 % Cr; 0,92 % Mn; 5,50 % C; 6,36 % W; 0,11 % V; 84,62 % Fe. В микроструктуре обнаружены неметаллические включения неправильной глобулярной формы, которые в основном располагаются вдоль межзеренных границ (рис. 1). Более крупное включение I имеет следующий химический состав: 7,90 % Na; 10,18 % Al; 19,88 % Si; 0,96 % Cr; 0,42 % Mn; 2,49 % W; 26,46 % C и 31,72 % Fe. Содержание натрия, алюминия, кремния, хрома, марганца, вольфрама может быть обусловлено методом нанесения наплавленного слоя [16].

В ходе проведенных исследований [5] с помощью СЭМ получили химический состав наплавленного покрытия, сформированного с использованием ПП системы Fe – C – Si – Mn – Cr – Ni – Mo: 0,58 % C; 0,64 % Si; 0,92 % Mn; 1,15 % Cr; 0,35 % Mo; 0,37 % Ni; 0,51 % V; 0,076 % S; 0,02 % P.

Микроструктура наплавленного слоя имеет дендритное строение и представляет собой грубоиглочатый мартенсит (рис. 2, а), что характерно для литых металлов. В ходе исследований были обнаружены силикатные включения глобулярной формы диаметром от 33 до 47 мкм (рис. 2, б). Химический состав неметаллических включений следующий: 49,79 % O; 1,64 % Na; 9,91 % Mg; 3,48 % Al; 22,09 % Si; 1,37 % S и 1,00 % Ca и 10,72 % Mn. Фазовый состав однороден и включает основные компоненты (оксиды кремния, марганца и магния, с незначительным содержанием алюминия и натрия).

В работе [17] микроструктура в нижнем, среднем и верхнем слоях наплавки состоит из мартенсита отпуска (рис. 3, а) и мартенсита, окруженного δ-ферритом (рис. 3, б, в). Тепло, возникающее при наплавлении третьего слоя, привело к отпуску мартенсита во втором слое, однако δ-феррит не подвергся воздействию. Таким образом, в середине наплавки образовался мартенсит отпуска, окруженный δ-ферритом.

В работе [18] исследовали возможность повышения структурных качеств наплавленных слоев (твердость и износостойкость) путем введения титана в состав ПП систем Fe – C – Si – Mn – Cr – Mo – Ni и Fe – C – Si – Mn – Cr – W – V,

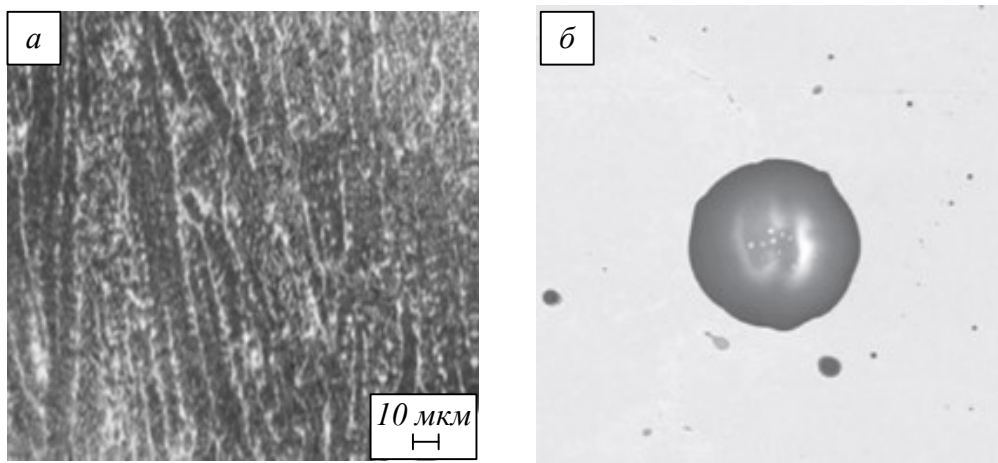


Рис. 2. Микроструктура наплавленного покрытия системы Fe – C – Si – Mn – Cr – Ni – Mo (а) и неметаллическое включение диаметром 33 мкм (б) [15]
 Fig. 2. Microstructure of the deposited coating of the Fe – C – Si – Mn – Cr – Ni – Mo system (а) and a non-metallic inclusion with a diameter of 33 μm (б) [15]

а также химический состав, структура, твердость и износостойкость слоев, наплавленных на сталь марки 09Г2С (рис. 4). При изучении степени загрязненности полученных наплавов неметаллическими включениями установлено наличие преимущественно недеформируемых силикатов и точечных оксидов. Увеличение содержания титана в наплавленных слоях незначительно влияет на уровень их загрязненности, при этом, наименьшее загрязнение наблюдается при пониженном содержании титана в слоях. Для слоев, наплавленных ПП системы Fe – C – Si – Mn – Cr – Mo – Ni – Ti, наименьшее загрязнение точечными оксидами и недеформируемыми силикатами установлено при содержании 0,008 и 0,013 % Ti. При увеличении концентрации титана до 0,019 и 0,035 % в наплавленных слоях наряду с оксидными включениями и недеформируемыми силикатами происходит образование нитридных включений. Для слоев, наплавленных ПП системы Fe – C – Si – Mn – Cr – Mo – Ni – Ti, наименьший уровень загрязненности неметаллическими включениями установлен при содержа-

нии 0,024 % Ti. Незначительная степень загрязненности исследуемых наплавленных слоев не оказывает отрицательного влияния на их свойства и приемлема для использования исследуемых ПП. Добавление титанового порошка в состав ПП систем Fe – C – Si – Mn – Cr – W – V и Fe – C – Si – Mn – Cr – Mo – Ni оказывает положительное влияние на микроструктуру наплавленных слоев. С увеличением содержания титана уменьшаются размеры игл мартенсита и первичного зерна аустенита. Улучшение микроструктуры наплавленных слоев с увеличением содержания титанового флюса в ПП сопровождается повышением твердости и снижением скорости износа слоев.

В работе [19] изображения поперечного сечения покрытий WC – Co (рис. 5, а) и Ni/WC – Co (рис. 5, б), полученных лазерной наплавкой. Покрытия характеризуются низким уровнем дефектов, а Ni/WC – Co демонстрирует более тонкую микроструктуру и более высокую износостойкость по сравнению с покрытием WC – Co. Покрытия состоят из фаз WC – Co, W₂C, Me₆C (Co₃W₃C, Fe₃W₃C и Ni₃W₃C) и α (Co, Ni и Fe).

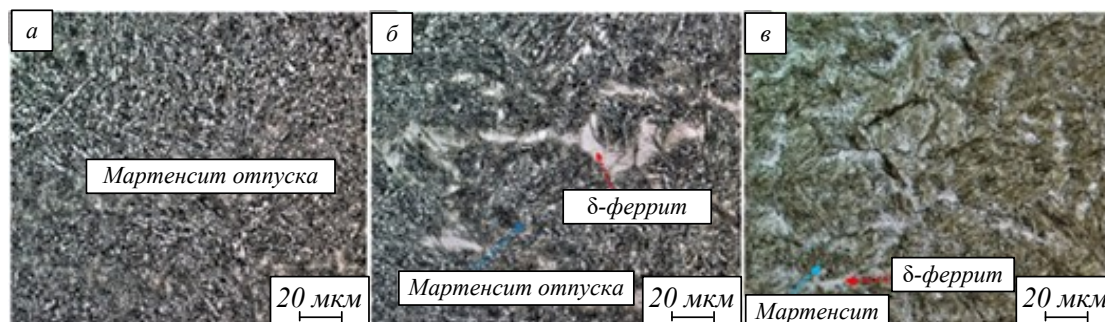


Рис. 3. Микроструктура наплавленного покрытия системы Fe – Cr – C – Mo – Mn:
 а – в – нижний, средний, верхний слои [17]
 Fig. 3. Microstructure of the deposited coating of the Fe – Cr – C – Mo – Mn system:
 а – в – lower; middle; upper layers [17]

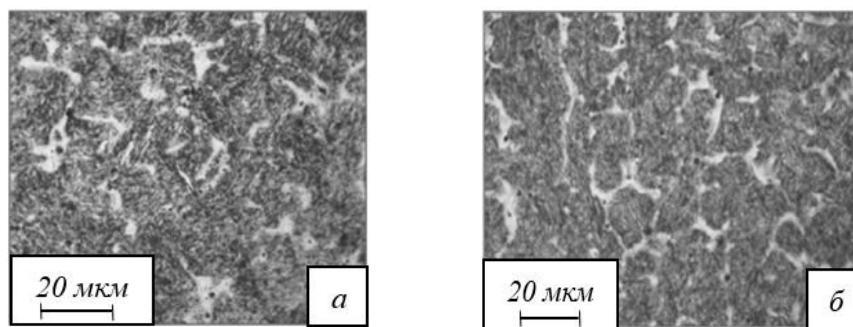


Рис. 4. Микроструктура образцов Fe – C – Si – Mn – Cr – Mo – Ni – Ti (а) и Fe – C – Si – Mn – Cr – W – V – Ti (б) [18]
 Fig. 4. Microstructure of samples Fe – C – Si – Mn – Cr – Mo – Ni – Ti (a) and Fe – C – Si – Mn – Cr – W – V – Ti (б) [18]

В работе [20] исследовали электродуговые покрытия систем Fe – Cr – C и Fe – Cr – В. Электродуговые покрытия имеют характерную пластинчатую структуру, где ламели в основном разделены оксидными пленками различной толщины и химической природы. Межламелярные границы содержат примеси сложных оксидов легирующих элементов ПП и поры (рис. 6). По сравнению с твердыми материалами, содержание хрома в шихте ПП 140X12, 140X12Н2ТЮ и 70X12РЗГС2Ю, равное 12 мас. %, не гарантирует требуемой коррозионной стойкости ЭДП, полученных из этих ПП, в нейтральных водных средах.

Для снижения количества оксидов хрома в шихту ПП принято добавлять 1 – 2 мас. % Ti, Al, Si и В. Это объясняется тем, что реакции окисления этих элементов имеют более отрицательные значения свободной энергии, чем соответствующие реакции с хромом, и, следовательно, их оксиды образуются быстрее.

Предложены формулы для оценки оптимального содержания хрома в ПП систем легирования Fe – Cr – C и Fe – Cr – В. Эти формулы учитывают неравномерное распределение хрома в ламелях покрытий, обусловленное их микрогетерогенностью, а также обеднение твердого раствора хромом за

счет образования оксидов, карбидов и боридов на основе хрома.

Выводы

В ходе исследования были проанализированы порошковые проволоки на основе систем, используемых для электродуговой наплавки: Fe – C – Si – Mn – Cr – W – V, Fe – C – Si – Mn – Cr – Ni – Mo, Fe – C – Si – Mn – Cr – Mo – Ni – Ti, Fe – C – Si – Mn – Cr – W – V – Ti, WC – Co, Ni/WC – Co, Fe – Cr – C и Fe – Cr – В.

Исследуемое покрытие порошковой проволоки на основе системы Fe – C – Si – Mn – Cr – W – V имеет высокое содержание углерода и вольфрама. В структуре наплавленного покрытия наблюдается грубоигольчатый мартенсит и неравномерное распределение неметаллических включений. Наплавленные слои имеют микроструктуру «волоконистого строения», характеризующейся четко выраженными межзеренными границами.

Покрытие порошковой проволоки на основе системы Fe – C – Si – Mn – Cr – Ni – Mo содержит меньше углерода, чем в первой системе. Микроструктура покрытия отличается сниженным количеством включений и имеет дендритное строение, которое представляет собой грубоигольча-

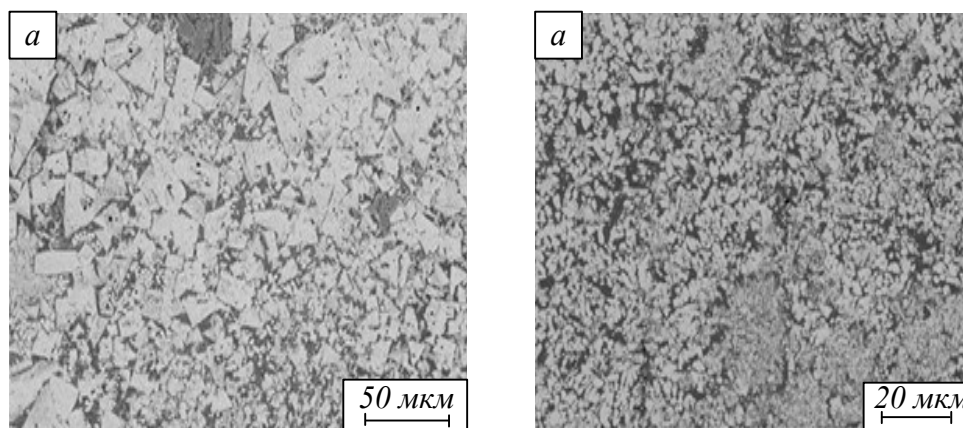


Рис. 5. Микроструктура наплавов WC – Co (а) и Ni/WC – Co (б) [19]
 Fig. 5. Microstructure of surfacing WC – Co (a) and Ni/WC – Co (б) [19]

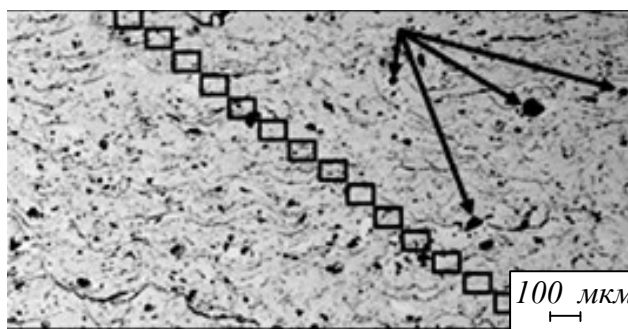


Рис. 6. Схема определения локального содержания легирующих элементов в покрытии, стрелками обозначены поры [20]
Fig. 6. Scheme for determining the local content of alloying elements in the coating, arrows indicate pores [20]

тый мартенсит, что характерно для литых металлов.

С увеличением содержания титана в рассмотренных системах Fe – C – Si – Mn – Cr – W – V – Ti и Fe – C – Si – Mn – Cr – Mo – Ni – Ti улучшается микроструктура наплавленных слоев, которая сопровождается повышением твердости и снижением скорости износа слоев.

Электродуговые покрытия систем Fe – Cr – C и Fe – Cr – В имеют характерную пластинчатую структуру, где межламельные границы содержат примеси сложных оксидов легирующих элементов ПП и поры.

Наплавленные покрытия на основе систем WC – Co и Ni/WC – Co, полученных лазерной наплавкой, характеризуются низким уровнем дефектов, где покрытие системы Ni/WC – Co имеет более тонкую микроструктуру и более высокую износостойкость по сравнению с покрытием WC – Co.

Порошковая проволока Fe – C – Si – Mn – Cr – Ni – Mo может быть рекомендована для применения при условиях, требующих защиты от коррозии, но с умеренными нагрузками.

Порошковая проволока Fe – C – Si – Mn – Cr – W – V отлично подходит для эксплуатации в условиях, где требуется высокая износостойкость.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Metlitskii V.A. Flux-cored wires for arc welding and surfacing of cast iron. *Welding International*. 2008;22(11):796–800. <https://doi.org/10.1080/09507110802593646>
2. Filippov M.A., Shumyakov V.I., Balin S.A., Zhilin A.S., Lehchilo V.V., Rimer G.A. Structure and wear resistance of deposited alloys based on metastable chromium-carbon austenite. *Welding International*. 2015;29(10):819–822. <https://doi.org/10.1080/09507116.2014.986891>
3. Пегашкин В.Ф. Сравнительный анализ технологий обработки прокатных валков. *Черные металлы*. 2024;11:22–26.
4. Liu D.S., Liu R.P., Wei Y.H. Influence of tungsten on microstructure and wear resistance of iron base hardfacing alloy. *Materials Science and Technology*. 2014;30(3):316–322. <https://doi.org/10.1179/1743284713Y.0000000359>
5. Козырев Н.А., Крюков Р.Е., Михно А.Р., Усольцев А.А., Денисов П.А. Изучение влияния введения в состав порошковой проволоки марки 35В9Х3СФ углеродфторсодержащей добавки. *Вестник Сибирского государственного индустриального университета*. 2019;4(30):16–20.
6. Михайловский Г.М., Нгуен В.В., Захаров П.К. Формирование износостойких слоев дуговой наплавкой с использованием порошковых проволок. *Глобальная энергия*. 2024;30(4):53–64.
7. Емелюшин А.Н., Петроченко Е.В., Нефедьев С.П. Исследование структуры и ударно-абразивной износостойкости покрытий системы Fe – C – Cr – Mn – Si, дополнительно легированных азотом. *Сварочное производство*. 2011;10:18–22.
8. Еремин Е.Н., Лосев А.С., Бородихин С.А., Маталасова А.Е., Пономарев И.А. Порошковая проволока для наплавки коррозионно-стойкой и износостойкой стали. *Вестник машиностроения*. 2018;7:66–68.
9. Макиенко В.М., Соколов П.В., Перваков Д.Г. Восстановление деталей и узлов подвижного состава методом электродуговой наплавки. *Транспорт Азиатско-Тихоокеанского региона*. 2016;1(6):6–11.
10. Li R., He D.Y., Zhou Z., Wang Z.J., Song X.Y. Wear and high temperature oxidation behavior of wire arc sprayed iron based coatings. *Surface Engineering*. 2014;30(11):784–790.
11. Бородихин С.А., Еремин Е.Н., Лосев А.С. Порошковая проволока с карбидом бора для восстановительной наплавки прокатных валков. *Россия молодая: передовые технологии – в промышленность*. 2015;1:11–14.
12. Яковлев Д.С. Анализ технологических особенностей сварки порошковой проволокой. *Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия «Металлургия»*. 2014;14(2):92–95.

13. Babinets A.A., Ryabtsev I.A., Panfilov A.I., Zhdanov V.A., Ryabtsev I.I. Influence of methods of arc surfacing with flux-cored wire on penetration of base metal and formation of deposited metal. *The Paton Welding Journal*. 2016;11:17–22. <https://doi.org/10.15407/tpwj2016.11.03>
14. Ryabtsev I.O., Babinets A.A., Lentugov I.P., Zhdanov V.O., Ryabtsev I.I., Osin V.V. Methods of Investigation of the Deposited Metal Properties and Their Application for the Development of Flux Cored Wires. *Materials Science*. 2024;59(4):467–473.
15. Козырев Н.А., Осетковский И.В., Усольцев А.А., Полевой Е.В., Михно А.Р. Исследование состава неметаллических включений и микроструктуры электродугового покрытия, сформированного с использованием порошковой проволоки системы Fe – C – Si – Mn – Cr – Ni – Mo. *Известия вузов. Черная металлургия*. 2022;65(6):421–426. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2022-6-421-426>
16. Райков С.В., Коновалов С.В., Капралов Е.В., Будовских А.Е., Целлермаер В.Я. Формирование износостойких поверхностных слоев наплавкой. *Известия вузов. Черная металлургия*. 2015;58(10):769–774. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2015-10-769-774>
17. Pournajaf E., Abbasi A., Hamidreza N. Microstructure and wear resistance of single- and multi-layered low-carbon Fe – Cr – C – Mo – Mn clads deposited by shielded metal arc welding. *Journal of Materials Engineering and Performance*. 2021;30(10):7704–7715.
18. Kibko N.V., Usoltsev A.A., Mikhno A.R., Sychev A.A. Effect of titanium on the structure and properties of clad metal from powder wires of Fe – C – Si – Mn – Cr – W – V and Fe – C – Si – Mn – Cr – Mo – Ni Systems. *Metal Science and Heat Treatment*. 2022;64(5–6):281–284. <https://doi.org/10.1007/s11041-022-00801-1>
19. Erfanmanesh M., Shoja-Razavi R., Abdollah Pour H., Mohammadian Semnani H., Barekat M., Hashemi S.H. Friction and wear behavior of laser clad WC – Co and Ni/WC – Co deposits at high temperature. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*. 2019;81:137–148.
20. Stupnytskyi T.R., Student M.M., Pokhmurska H.V., Hvozdzetskyi V.M. Optimization of the Chromium Content of Powder Wires of the Fe – Cr – C and Fe – Cr – B Systems According to the Corrosion Resistance of Electric-Arc Coatings. *Materials Science*. 2016;52(2):165–172. <https://doi.org/10.1007/s11003-016-9939-8>

REFERENCES

1. Metlitskii V.A. Flux-cored wires for arc welding and surfacing of cast iron. *Welding International*. 2008;22(11):796–800. <https://doi.org/10.1080/09507110802593646>
2. Filippov M.A., Shumyakov V.I., Balin S.A., Zhilin A.S., Lehchilo V.V., Rimer G.A. Structure and wear resistance of deposited alloys based on metastable chromium-carbon austenite. *Welding International*. 2015;29(10):819–822. <https://doi.org/10.1080/09507116.2014.986891>
3. Pegashkin V.F. Comparative analysis of mill roll processing technologies. *Chernye metally*. 2024;11:22–26. (In Russ.).
4. Liu D.S., Liu R.P., Wei Y.H. Influence of tungsten on microstructure and wear resistance of iron base hardfacing alloy. *Materials Science and Technology*. 2014;30(3):316–322. <https://doi.org/10.1179/1743284713Y.0000000359>
5. Kozyrev N.A., Kryukov R.E., Mikhno A.R., Usoltsev A.A., Denisov P.A. Study of the effect of introducing a carbon-fluorine-containing additive into the composition of flux-cored wire grade 35V9Kh3SF. *Vestnik Sibirskogo gosudarstvennogo industrial'nogo universiteta*. 2019;4(30):16–20. (In Russ.).
6. Mikhailovskii G.M., Nguen V.V., Zakharov P.K. Formation of wear-resistant layers by arc surfacing using flux-cored wires. *Global'naya ehnergiya*. 2024;30(4):53–64. (In Russ.).
7. Emelyushin A.N., Petrochenko E.V., Nefed'ev S.P. Study of the structure and impact-abrasive wear resistance of coatings of the Fe – C – Cr – Mn – Si system, additionally alloyed with nitrogen. *Svarochnoe proizvodstvo*. 2011;10:18–22. (In Russ.).
8. Eremin E.N., Losev A.S., Borodikhin S.A., Matalasova A.E., Ponomarev I.A. Flux-cored wire for surfacing corrosion-resistant and wear-resistant steel. *Vestnik mashinostroeniya*. 2018;7:66–68. (In Russ.).
9. Makienco V.M., Sokolov P.V., Pervakov D.G. Restoration of rolling stock parts and assemblies using electric arc surfacing. *Transport Aziatsko-Tikhookeanskogo regiona*. 2016;1(6):6–11. (In Russ.).
10. Li R., He D.Y., Zhou Z., Wang Z.J., Song X.Y. Wear and high temperature oxidation behavior of wire arc sprayed iron based coatings. *Surface Engineering*. 2014;30(11):784–790.
11. Borodikhin S.A., Eremin E.N., Losev A.S. Boron carbide flux-cored wire for restorative surfacing of rolling rolls. *Rossiya molodaya: peredovye tekhnologii – v promyshlennost'*. 2015;1:11–14. (In Russ.).
12. Yakovlev D.S. Analysis of technological features of flux-cored wire welding. *Vestnik Yu-*

- zhno-Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya «Metallurgiya». 2014;14(2):92–95. (In Russ.).*
13. Babinets A.A., Ryabtsev I.A., Panfilov A.I., Zhdanov V.A., Ryabtsev I.I. Influence of methods of arc surfacing with flux-cored wire on penetration of base metal and formation of deposited metal. *The Paton Welding Journal*. 2016;11:17–22.
<https://doi.org/10.15407/tpwj2016.11.03>
 14. Ryabtsev I.O., Babinets A.A., Lentugov I.P., Zhdanov V.O., Ryabtsev I.I., Osin V.V. Methods of Investigation of the Deposited Metal Properties and Their Application for the Development of Flux Cored Wires. *Materials Science*. 2024;59(4):467–473.
 15. Kozyrev N.A., Osetkovskii I.V., Usol'tsev A.A., Polevoi E.V., Mikhno A.R. Study of the composition of non-metallic inclusions and microstructure of an electric arc coating formed using a flux-cored wire of the Fe – C – Si – Mn – Cr – Ni – Mo system. *Izvestiya vuzov. Chernaya metallurgiya*. 2022;65(6):421–426. (In Russ.).
<https://doi.org/10.17073/0368-0797-2022-6-421-426>
 16. Raikov S.V., Konovalov S.V., Kapralov E.V., Budovskikh A.E., Tsellermaer V.Ya. Formation of wear-resistant surface layers by surfacing. *Izvestiya vuzov. Chernaya metallurgiya*. 2015;58(10):769–774. (In Russ.).
<https://doi.org/10.17073/0368-0797-2015-10-769-774>
 17. Pournajaf E., Abbasi A., Hamidreza N. Microstructure and Wear Resistance of Single- and Multi-Layered Low-Carbon Fe – Cr – C – Mo – Mn Clads Deposited by Shielded Metal Arc Welding. *Journal of Materials Engineering and Performance*. 2021;30(10):7704–7715.
 18. Kibko N.V., Usoltsev A.A., Mikhno A.R., Sychev A.A. Effect of Titanium on the Structure and Properties of Clad Metal from Powder Wires of Fe – C – Si – Mn – Cr – W – V and Fe – C – Si – Mn – Cr – Mo – Ni Systems. *Metal Science and Heat Treatment*. 2022;64(5-6):281–284.
<https://doi.org/10.1007/s11041-022-00801-1>
 19. Erfanmanesh M., Shoja-Razavi R., Abdollah Pour H., Mohammadian Semnani H., Barekat M., Hashemi S.H. Friction and wear behavior of laser clad WC – Co and Ni/WC – Co deposits at high temperature. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*. 2019;81:137–148.
 20. Stupnytskyi T.R., Student M.M., Pokhmurska H.V., Hvozdet'skyi V.M. Optimization of the Chromium Content of Powder Wires of the Fe – Cr – C and Fe – Cr – B Systems According to the Corrosion Resistance of Electric-Arc Coatings. *Materials Science*. 2016;52(2):165–172.
<https://doi.org/10.1007/s11003-016-9939-8>
- Сведения об авторах:**
Алексей Романович Михно, научный сотрудник лаборатории электронной микроскопии и обработки изображений, Сибирский государственный индустриальный университет
E-mail: mihno_ar@sibsiu.ru
ORCID: 0000-0002-7305-6692
SPIN-код: 5553-1164
- Галина Игоревна Махнева**, инженер-исследователь лаборатории электронной микроскопии и обработки изображений, Сибирский государственный индустриальный университет
E-mail: glcherepanova25@mail.com
ORCID: 0009-0003-2592-6539
SPIN-код: 3610-9340
- Николай Павлович Ломиворотов**, инженер-исследователь лаборатории электронной микроскопии и обработки изображений, Сибирский государственный индустриальный университет
E-mail: lomivorotov_np@sibsiu.ru
ORCID: 0009-0000-7953-2920
- Екатерина Михайловна Запольская**, к.т.н., с.н.с. лаборатории электронной микроскопии и обработки изображений, Сибирский государственный индустриальный университет
E-mail: beloglazova-ekat@mail.ru
ORCID: 0000-0002-8098-5895
SPIN-код: 7302-2751
- Ирина Алексеевна Панченко**, к.т.н., заведующий лабораторией электронной микроскопии и обработки изображений, Сибирский государственный индустриальный университет
E-mail: panchenko_ia@sibsiu.ru
ORCID: 0000-0002-1631-9644
SPIN-код: 4253-6679
- Сергей Валерьевич Коновалов**, д.т.н., профессор, проректор по научной и инновационной деятельности, Сибирский государственный индустриальный университет
E-mail: konovalov@sibsiu.ru
ORCID: 0000-0003-4809-8660
SPIN-код: 4391-7210
- Information about the authors:**
Aleksei R. Mikhno, Researcher at the Laboratory of Electron Microscopy and Image Processing, Siberian State Industrial University
E-mail: mihno_ar@sibsiu.ru
ORCID: 0000-0002-7305-6692
SPIN-код: 5553-1164

Galina I. Makhneva, research engineer at the Electron Microscopy and Image Processing Laboratory, Siberian State Industrial University

E-mail: glcherepanova25@mail.com

ORCID: 0009-0003-2592-6539

SPIN-код: 3610-9340

Nikolai P. Lomivorotov, Research Engineer at the Electron Microscopy and Image Processing Laboratory, Siberian State Industrial University

E-mail: lomivorotov_np@sibsiu.ru

ORCID: 0009-0000-7953-2920

Ekaterina M. Zapolskaya, Cand. Sci. (Eng.), senior researcher Laboratory of Electron Microscopy and Image Processing, Siberian State Industrial University

E-mail: beloglazova-ekat@mail.ru

ORCID: 0000-0002-8098-5895

SPIN-код: 7302-2751

Irina A. Panchenko, Candidate of Technical Sciences, Head of the Laboratory of Electron Microscopy and Image Processing, Senior Researcher of the Scientific Research Department, Siberian State Industrial University

E-mail: panchenko_ia@sibsiu.ru

ORCID: 0000-0002-1631-9644

SPIN-код: 4253-6679

Sergei V. Konovalov, Doctor of Technical Sciences, Professor, Vice-Rector for Research and Innovation Activities, Siberian State Industrial University

E-mail: konovalov@sibsiu.ru

ORCID: 0000-0003-4809-8660

SPIN-код: 4391-7210

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The authors declare that there is no conflict of interest.

Поступила в редакцию 03.02.2026

После доработки 01.03.2026

Принята к публикации 11.03.2026

Received 03.02.2026

Revised 01.03.2026

Accepted 11.03.2026